

## **EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PANELES DE SILICIO AMORFO TRIPLEJUNTURA BAJO CONDICIONES NATURALES**

M.Torres, M.Battioni<sup>1</sup>, M.Cutrerá<sup>2</sup>, G.Risso<sup>1</sup>, B.Gottlieb<sup>1</sup>, R.H.Buitrago<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>CONICET – UNL

Güemes 3450 – 3000 Santa Fe

TE/Fax: 54-342-4559190 e-mail: [rbuitre@intec.unl.edu.ar](mailto:rbuitre@intec.unl.edu.ar)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química – UNL

Sgo. Del Estero 2829 – 3000 Santa Fe

### **RESUMEN**

Se informan los resultados obtenidos durante un semestre, del comportamiento de módulos fotovoltaicos amorfos triple juntura, bajo condiciones naturales. Se desarrolló un sistema de adquisición de datos para obtener los parámetros característicos de un módulo. Se propone un método de cálculo de la Potencia Máxima y de los Ampere-Hora generados por los módulos a partir del factor de llenado. Los resultados muestran que estos módulos no sufren degradación y que su eficiencia mejora tanto con la temperatura ambiente como con la propia de las celdas.

**PALABRAS CLAVES:** Módulos Triplejuntura - Degradación - Factor de Llenado.

### **INTRODUCCION**

El gran entusiasmo por los módulos de Silicio amorfo, como alternativa energética de bajo costo en la década de los 80, se perdió rápidamente ante la significativa degradación de sus propiedades fotovoltaicas al ser expuestos a la luz solar.(Berry y Hahn, 1991; Buitrago et al., 2000). Una solución técnica propuesta para evitar la recombinación de los portadores, que da origen a la creación de defectos en la banda prohibida del silicio amorfo, era la de diseñar las celdas con fuertes campos eléctricos internos. Esto se logró mediante la división de la zona de material intrínseco, donde se produce la absorción de la luz, en dos o tres subcapas, interponiendo entre ellas uniones tipo pn, dando como resultado una celda con estructura multijuntura.(Schropp y Zeman, 1998)

Con este tipo de estructura se ha logrado en la actualidad no solo estabilizar los rendimientos de los paneles sino que también se han mejorado sustancialmente las eficiencias de conversión lográndose en celdas de 1 cm<sup>2</sup> valores estables mejores al 13%.(Yang et al., 1997)

Recientemente se han incorporado al mercado módulos de estas características, presentando diferentes opciones no solo en potencia sino en forma y sustratos sobre los que son laminados. Mediante un convenio con la firma United Solar Systems Inc. de los Estados Unidos de Norteamérica, el Grupo GENOC recibió para su estudio y evaluación tres módulos. Dos de ellos corresponden a los modelos US-32 y US-26 y su forma exterior es la convencional, solo que no llevan vidrios frontales. El tercero se trata de módulos laminados directamente sobre una chapa galvanizada plana con encastrados laterales para ser usada en la construcción de viviendas, es el modelo SSR-64, lo que es una novedad en aplicaciones fotovoltaicas.

En este trabajo se presentan resultados preliminares de la evaluación del comportamiento de estos módulos bajo condiciones naturales, esta forma se considera la mas confiable dado que si bien los métodos acelerados de laboratorio pueden dar información sobre estadísticas de fallas, una combinación de condiciones ambientales pueden conducir a resultados diversos.(Berman et al., 1999) De los factores ambientales se seleccionaron para su seguimiento insolación directa y difusa, temperatura, presión, humedad, velocidad de vientos, ángulo de incidencia de la radiación, conjuntamente con el seguimiento de la potencia máxima, energía generada y ampere-hora entregados por los módulos.

Se propone un modelo para adquisición y procesamiento de datos, el cual pone énfasis en el control de la estabilidad de los módulos vía la medición del factor de llenado o forma, de los mismos. Los resultados parciales obtenidos se muestran a través de gráficas en las que se pueden observar diferencias de comportamiento con lo esperado para módulos construidos con celdas de silicio cristalino.(Berman et al., 1999)

Ante esto se incorporó en el último mes un modulo Solartec modelo M75 de 50 Wp de potencia, para realizar un estudio comparativo sistemático entre tipos de módulos. Finalmente se realizó un seguimiento del efecto estacional dado que en estos módulos, dos de sus junturas tienen una banda prohibida de 1,74 eV correspondiente al silicio amorfo, y la tercera es una aleación con Germanio, que lleva su banda a valores de 1,2 eV, lográndose de este modo correr la banda que se aprovecha del espectro solar de 350 a 750 nm ( gap 1,74 eV) hasta 1200 nm (gap 1,2 eV). Este control se efectúa con los valores de la corriente de cortocircuito normalizada a condiciones estándares en función del tiempo.(Berman et al., 1999)

### **MONTAJE EXPERIMENTAL**

En un área parquizada abierta del Campo Universitario de la Universidad Nacional del Litoral, ubicado en la ciudad de Santa Fe, sobre una base de pilotes de cemento se montó una estructura metálica de soporte para los módulos fotovoltaicos. Se fijaron sobre un plano inclinado 31° respecto a la horizontal, valor que corresponde a la latitud del lugar, mirando hacia el norte geográfico. A cada modulo se le adhirió en su parte posterior céntrica un termómetro de Platino (PT100). Sobre el

plano se colocó también un solarímetro de doble cúpula marca Kipp Zonen modelo C6, y en la parte superior de la estructura, una celda de silicio cristalino calibrada para medición de radiación global en el plano horizontal. Las mediciones de radiación, tensión y corriente tienen una precisión de  $\pm 0.1\%$  y las temperaturas  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Todos estos elementos se conectaron a un sistema de adquisición de datos tipo datalogger, con capacidad para almacenar todos los datos tomados cada 10 minutos por 15 días, y disponer de una carga electrónica variable programable para adquirir curvas I-V. La CPU del sistema es un micro 80C52 con 64 Kb de memoria RAM. Los datos se descargan a una computadora portátil mediante un puerto serie.

## DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Una de las formas típicas de evaluar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos es estudiando la variación del Factor de Llenado (FF) a través del tiempo, el cual es una variable sensible a los cambios en las propiedades electro-ópticas que van sufriendo los paneles expuestos al medio ambiente (Burdick et al, 1996; Schropp y Zeman, 1998). El FF está definido a partir de la corriente de corto circuito ( $I_{cc}$ ), la corriente ( $I_{mx}$ ) y el voltaje de máxima potencia ( $V_{mx}$ ), y el voltaje de circuito abierto ( $V_{ca}$ ):

$$FF = I_{mx} \cdot V_{mx} / I_{cc} \cdot V_{ca} \quad (1)$$

Es bien conocido para módulos cristalinos que  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$  dependen de la temperatura de las celdas, a medida que esta aumenta el  $V_{ca}$  disminuye y la  $I_{cc}$  crece ligeramente; y de la radiación, aumentando linealmente la corriente y logarítmicamente el voltaje, así como del efecto estacional por variación espectral de la radiación al tratarse de celdas de una sola banda. (Seraphin, 1979) En el caso de estos nuevos módulos es previsible un comportamiento similar en relación a la temperatura de las celdas e intensidad de la radiación solar (con mayor o menor sensibilidad), pero no podemos extrapolar como influirán las condiciones del medio ambiente en la temperatura de las celdas, debido a que son diferentes las estructuras de ensamble (modulo laminado directamente sobre una chapa, ausencia de vidrios frontales), y la composición de la radiación diaria (directa y difusa) y estacional (distribución espectral), en la generación de energía, por ser celdas multijuntura en serie. Para este trabajo partimos del supuesto que el FF debe permanecer constante, independiente de la temperatura y radiación, a menos que sucedan fenómenos de degradación que impliquen cambios en las propiedades de los materiales constituyentes de las celdas (Coors et al., 1998). Por su definición, es posible expresar el FF como el producto de dos factores uno de corriente ( $F_c$ ) y otro de voltaje ( $F_v$ ) de acuerdo a las siguientes formulas:

$$F_c = I_{mx} / I_{cc} \quad (2)$$

$$F_v = V_{mx} / V_{ca} \quad (3)$$

De modo que la hipótesis básica de este trabajo asume que las corrientes y los voltajes en forma independiente pueden ser afectados por las condiciones ambientales pero en forma proporcional de modo que sus cocientes permanecerán constantes. De verificarse esta hipótesis el cálculo de la potencia máxima de un modulo para cualquier radiación y temperatura se reduce a conocer el FF y sólo medir dos datos  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$ , en sustitución de la curva I-V. Esto redundaría en una reducción sustancial de datos a acumular en un proyecto de estudio temporal de los módulos.

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos para el FF del modulo SSR-64 desde diciembre de 2000 a mayo de 2001, resultados similares se obtuvieron para los otros dos módulos. El FF graficado es el valor promedio calculado a partir de curvas I-V tomadas una vez por semana y varias en el mismo día desde las 9 a las 18 horas. En ningún caso hubo variaciones mayores al 5%, siendo los puntos más dispersos los correspondientes a las horas o días de baja insolación, por lo que se atribuye un mayor peso a los errores en la medición que a efectos de temperatura y composición espectral de la radiación.

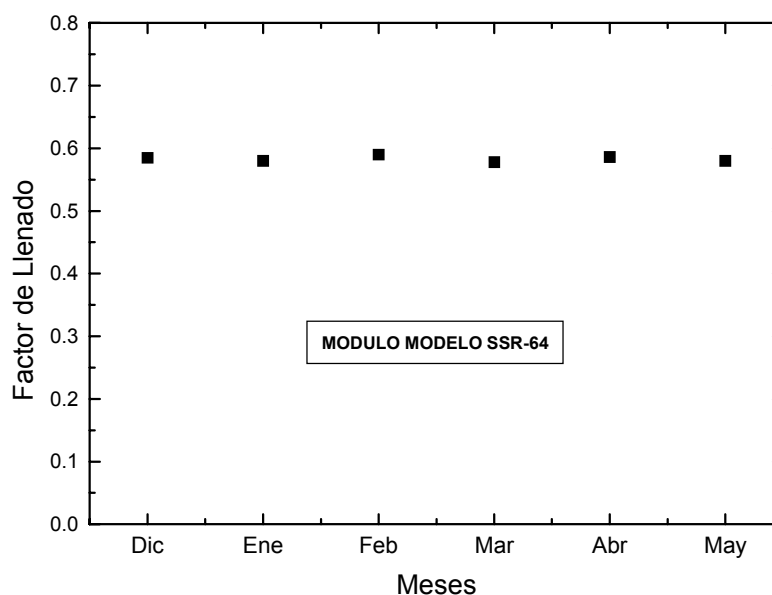


Fig 1.- Variación mensual del factor de llenado

La misma constancia se verifica en los coeficientes  $F_c$  y  $F_v$  como se muestra en la Tabla I. Podemos notar en la cuarta columna que el coeficiente  $F_v$  es el mismo para los tres módulos, este resultado es de esperar por que el  $V_{ca}$  tiene una fuerte dependencia de las bandas y posición del nivel de Fermi, que en estos casos son estructuralmente iguales y una dependencia ligera de los otros factores.

Tabla I : Factor de Llenado y Coeficientes de Corriente y Voltaje.

MODULO	FF	$F_c$	$F_v$
Chapa SSR-64	0,628	0,85	0,738
Grande US-32	0,634	0,844	0,738
Chico US-26	0,572	0,778	0,738

A partir de los datos diarios tomados cada 10 minutos: corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, temperatura del módulo, radiación en el plano de los paneles, datos climatológicos brindados por una estación perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL, instalada al lado de la estructura que soporta los módulos, y los coeficientes de la Tabla I, es posible calcular:

- La energía generada por los módulos, integrando la curva de potencia máxima en función del tiempo.
- Los ampere-hora generados, integrando la curva de corriente máxima en función del tiempo, .
- La eficiencia de conversión global diaria de los módulos a través del cociente entre la energía generada en un día y la radiación global recibida por el módulo.

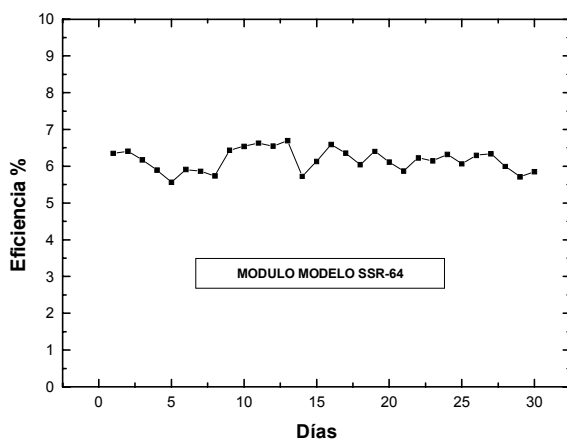


Fig.2.- Eficiencia de conversión para el mes de abril de 2001

En la Figura 2 se muestra cómo fluctúa la eficiencia de conversión para el módulo SSR-64 correspondiente al mes de abril, vemos que los valores se mantienen dentro del rango de 6-7 %, siendo éste uno de los meses en que mayor variación se observó. Para tratar de determinar las causas posibles de este comportamiento, se graficaron simultáneamente con los dos parámetros críticos, la temperatura de módulo y ambiente, y la radiación global. Los resultados se muestran en la Figura 3.

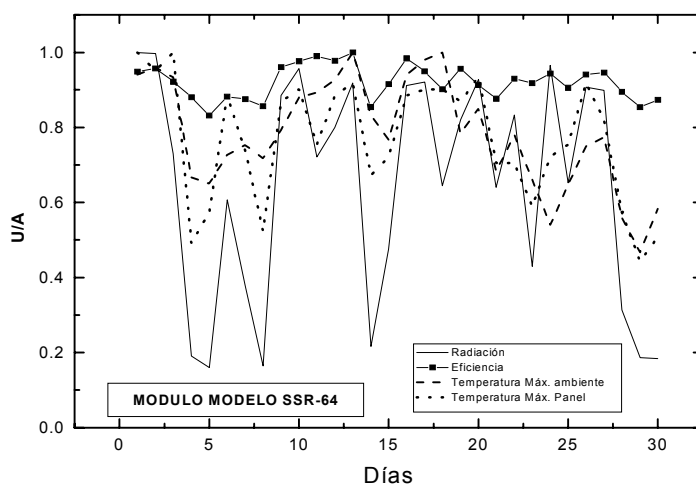


Fig.3.- Eficiencia del modulo SSR-64 en función de la radiación, temperaturas de módulo y ambiente, normalizadas al mayor valor que presentaron en el mes de abril.

De esta figura, la única conclusión general que podemos extraer es que tanto la eficiencia como la temperatura del panel siguen la variación de la radiación, pero no se aprecia una tendencia definida en relación a la temperatura ambiente. Por este motivo, como abril se presentaba como un mes con grandes variaciones de radiación y temperatura ambiente, se construyeron las Figuras 4 y 5.

El resultado de ambas figuras es interesante y diferente al de un panel cristalino, para el cual las temperaturas tienen un fuerte impacto depresor en la eficiencia (Seraphim, 1979), mientras que en estos módulos amorfos el incremento de la temperatura de la celda o ambiente, en promedio puede mejorar de un 15 a 20 % la eficiencia de conversión.

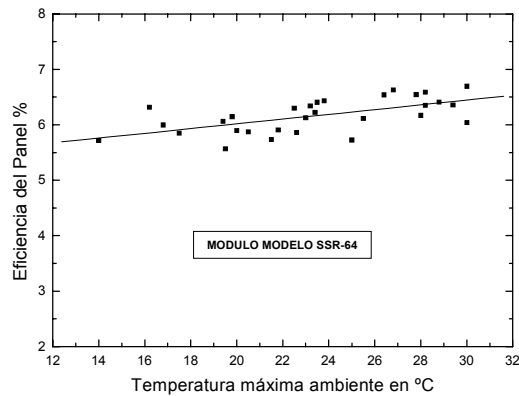


Fig.4.- Eficiencia del módulo SSR-64 en función de la temperatura ambiente máxima

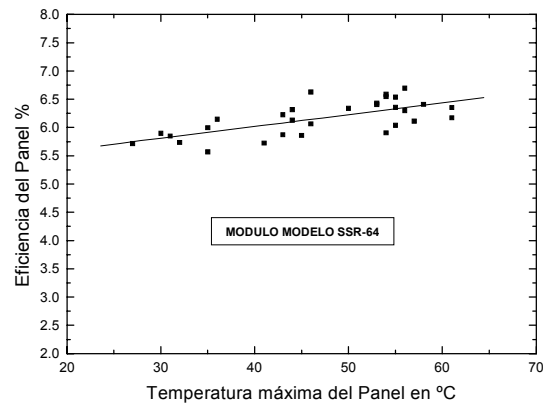


Fig.5.- Eficiencia del módulo SSR-64 en función la temperatura máxima de las celdas

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al cabo de un seguimiento semestral de módulos amorfos triple juntura muestran algunos aspectos interesantes de estos módulos. Primero la constancia del factor de llenado es la mejor prueba de que no ha habido ninguna pérdida por degradación, segundo la constancia de la eficiencia revela poca o ninguna influencia de la radiación en cuanto a intensidad, composición y distribución espectral y finalmente su aumento con la temperatura tanto de las celdas como del medio ambiente, hace altamente aconsejable su uso en zonas cálidas.

## REFERENCIAS

- Berry W.B. y Hahn M.J. (1991). Light induced defect influence on a-Si field best performance. 10<sup>th</sup> Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisboa, Portugal, 387.
- Buitrago R.H., Risso G., Cutrera M., Concarí S., Battioni M., Gottlieb B. (2000). Celdas Solares utilizando Silicio Microcristalino Compensado como material de absorción. Comunicaciones del XXIII Congreso de ASADES, 04.05.
- Schropp R.E.I. y Zeman M. (1998). Amorphous and microcrystalline Solar Cells: Modeling, materials and Device Technology. Kluwer Academic Publishers, London, Reino Unido.
- Yang, J., Banerjee A. y Guha, S. (1997). Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial an 13.0% stable conversion efficiencies, Appl. Phys. Letters 70 (22), 2975.
- Berman, D., Faiman, D., Farhi B. (1999). Sinusoidal spectral correction for high precision outdoor module characterization, Solar Energy Materials & Solar Cells 58, 253.
- Burdick, J., Pruett, J., Beck, E. (1996). Qualification testing of thin-film and crystalline photovoltaic modules, Solar Energy Materials & Solar Cells 41/42, 575.
- Seraphim, B.O. (1979) Solar Energy Conversion, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Coors, S., Schneider, Bohm, M. (1998), 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 902.

## ABSTRACT

Behaviour under natural conditions of triple junction silicon amorphous alloy photovoltaic modules is being reported for one semester. An acquisition data equipment has been built to collect the characteristic parameters of modules. A method to calculate de Maximum Power and Ampere-Hour generated by modules based on the Fill Factor is proposed. Results showed that the modules are not degraded and their efficiencies improve either with the ambient temperature or with the cells temperature.